

全国第五届研究生数学建模竞赛



题 目 汶川地震中唐家山堰塞湖泄洪问题的计算分析

摘 要

“5.12”汶川大地震后,加强震后次生灾害规律具有重要的科研和社会价值。本文以唐家山堰塞湖为例,研究了堰塞湖蓄水预测、溃坝模型和泄洪规律:

问题一: 预测湖蓄水量、坝前水位随时间的变化。

(1) 利用量纲分析,根据实际数据,利用 NEWTON 法在 SAS 进行多项式拟合,得 $V(h) = 0.689306 + 0.0434h + 9.911 \times 10^{-6}h^3$ 。

(2) 我们建立基于天气预报和预报因子的蓄水来水预测模型,考虑了降雨和上游补水,引入降水后汇湖的延时效应和预报因子,80% 预报因子得到的水位高度和实际非常接近。

问题二: 我们建立基于缺口宽度、深度、流速、时间等参数的溃坝模型。充分考虑溃口形状、泥沙侵蚀和水流运输能力,溃决过程中的 E2ED 模型包括溃口侵蚀和底部扩展。溃口流量采用宽顶堰流量公式。模型中方程组难用解析解表示,我们设计了计算机仿真算法。通过对比实际泄洪数据,我们调整部分模型参数,模拟效果和实际相符(见图 9)。进而模拟自然溃决过程,水库蓄水在 90 分钟内由 2.457 降至 0.79236 亿立方米,漫顶溃坝对下游将造成巨大灾难。

问题三: 我们利用一维浅水方程组,合理简化相关参数,模拟了 1/3 溃坝洪水的一维演进。洪水会沿着通口河、涪江河道推进,假设河道宽度不变,我们得到了洪水水流速度和淹没区域,得到洪水到某地的时间(图 11-13),参考文献资料,我们给出了人口密集的绵阳市的人员撤离方案。

问题四: 由前三问结论我们可以评估这次政府采取的泄洪和人员撤离方案是正确的,开创了先河。但是,考虑到地震等次生危害复杂性和严重性,我们提出了未来相关科研工作的建议。

这四个问题的研究,为我们建立包括预报、应急措施制定、溃坝模拟、洪水演进、撤离方案一体化系统,提供一定参考。

关键词: 多项式拟合 溃坝模型 洪水演进 计算机模拟 堰塞湖 评估

参赛队号 1056204

参赛密码 _____
(由组委会填写)

汶川地震中唐家山堰塞湖泄洪问题的计算分析

摘要

“5.12”汶川大地震后,加强震后次生灾害规律具有重要的科研和社会价值。本文以唐家山堰塞湖为例,研究了堰塞湖蓄水预测、溃坝模型和泄洪规律:

问题一:预测湖蓄水量、坝前水位随时间的变化。

(1)利用量纲分析,根据实际数据,利用 NEWTON 法在 SAS 进行多项式拟合,得 $V(h) = 0.689306 + 0.0434h + 9.911 \times 10^{-6}h^3$ 。

(2)我们建立基于天气预报和预报因子的蓄水来水预测模型,考虑了降雨和上游补水,引入降水后汇湖的延时效应和预报因子,80%预报因子得到的水位高度和实际非常接近。

问题二:我们建立基于缺口宽度、深度、流速、时间等参数的溃坝模型。充分考虑溃口形状、泥沙侵蚀和水流运输能力,溃决过程中的 E2ED 模型包括溃口侵蚀和底部扩展。溃口流量采用宽顶堰流量公式。模型中方程组难用解析解表示,我们设计了计算机仿真算法。通过对比实际泄洪数据,我们调整部分模型参数,模拟效果和实际相符(见图 9)。进而模拟自然溃决过程,水库蓄水在 90 分钟内由 2.457 降至 0.79236 亿立方米,漫顶溃坝对下游将造成巨大灾难。

问题三:我们利用一维浅水方程组,合理简化相关参数,模拟了 1/3 溃坝洪水的一维演进。洪水会沿着通口河、涪江河道推进,假设河道宽度不变,我们得到了洪水水流速度和淹没区域,得到洪水到某地的时间(图 11-13),参考文献资料,我们给出了人口密集的绵阳市的人员撤离方案。

问题四:由前三问结论我们可以评估这次政府采取的泄洪和人员撤离方案是正确的,开创了先河。但是,考虑到地震等次生危害复杂性和严重性,我们提出了未来相关科研工作的建议。

这四个问题的研究,为我们建立包括预报、应急措施制定、溃坝模拟、洪水演进、撤离方案一体化系统,提供一定参考。

关键词: 多项式拟合 溃坝模型 洪水演进 计算机模拟 堰塞湖 评估

1 问题重述

2008 年 5 月 12 日发生在我国四川汶川地区的 8.0 级大地震,给人民生命财产和国民经济造成了极大的损失。地震引起的次生灾害比如堰塞湖给灾区人民带来更大的威胁,加强对震后次生灾害规律的研究将具有重大的理论及实践价值。请以影响最大的唐家山堰塞湖为例,收集新闻报道和其他数据资料,研究堰塞湖及其泄洪规律:

(1)建立唐家山堰塞湖以水位高程为自变量的蓄水量的数学模型,并以该地区天气预报的降雨情况的 50%, 80%, 100%, 150% 为实际降雨量建立模型,预计自 5 月 25 日起至 6 月 12 日堰塞湖水位每日上升的高度。

(2)利用唐家山堰塞湖泄洪时记录的数据,尝试在合理的假设下建立堰塞湖蓄水漫顶后在水流作用下发生溃坝的数学模型,建议包含缺口宽度、深度、水流速度、水量、水位高程,时间等变量。

(3)根据数字地图给出坝体发生溃塌,造成堰塞湖内 1/3 的蓄水突然下泻时的洪水水流速度及淹没区域(包括洪水到达各地的时间),并在此基础上考虑

洪水淹没区域中人口密集区域的人员撤离方案。

（4）请根据你们所建立的数学模型分析当时所采取对策的正确性和改进的可能性。讨论为应对地震后次生山地灾害（不限堰塞湖），科技工作中应该设法解决的关键问题，并提出有关建议。

2 研究背景及现状

2.1 问题背景

四川“5.12”汶川大地震形成 34 个主要堰塞湖，超过半数处于中危以上。河道持续来水，加上连日降雨，水位逐渐上涨和渗流加剧，堰塞湖随时都可能溃决，严重威胁下游河道两侧数百万的人民和救灾重建队伍的安全。科研人员在资料匮乏的条件下，快速预报了典型堰塞湖的来流入库过程和溃口发展过程，模拟了不同溃坝情况下洪水的传播过程，为堰塞湖溃决风险评估和应急措施提供科学依据。如今此题的研究，对将来建立来流预报、泄流溃决模型、洪水淹没及推进模型、应急措施和风险评估一体的完整模型体系，有一定参考价值。

唐家山堰塞湖是 34 个主要地震堰塞湖中规模最大最危险的。该堰塞湖是由通口河右岸山体大规模滑坡堵江而成，距北川县城上游约 6 公里，坝体在平面上呈长条形，顺河长约 803 米，横河宽最大约 611 米，坝高 82~124 米，坝顶面宽约 300 米，体积约 2037 万立方米^[1]。唐家山堰塞湖库容量约 3 亿立方米，日入湖水量约 700 万立方米，水位每天上涨 1 米左右，湖上游集雨面积 3550 平方公里。



图 1、唐家山堰塞湖地理位置及周边环境

专家认为，假如唐家山堰塞湖堰体出现溃塌，可能有 1 / 3 溃塌、1 / 2 溃塌、全线溃塌三种情况。据估计，全线溃塌处于洪水线下的灾区人口将达 130 万人，主要涉及通口河沿线的曲山、陈家坝、通口、香泉、含增、香水、西屏、龙凤、青莲等乡镇的部分区域。其中，北川县城、通口镇和成绵高桥距坝址分别为 3.5km、25.1km、64km。

5 月 20 日实测当时堰塞湖坝顶最低部位 752 米。水利部总工程师刘宁说，上游每降 2 毫米雨，将导致唐家山堰塞湖库存量上涨一米。如果蓄满水，库容量将高达 3.2 亿立方米。超过堰顶最低处 752 米，很大可能引起蓄水漫顶溃坝。

通过工程措施,我们开挖了导流槽,将湖水平稳宣泄,降低堰塞湖水位。唐家山堰塞湖开挖 13 万立方米土石方量,形成长 340 米,顶宽 40 米,底宽 7~10 米,进口高程 740 米,平缓段 739 米的梯形导流槽。6 月 9 日 8 时,唐家山堰塞湖坝前水位涨至 742.58 米,较昨日 8 时水位上涨 0.92 米,相应蓄水量 2.457 亿立方米,日平均入湖流量约为 115 立方米每秒。从 8 号开始泄洪,泄洪槽在湖水的冲刷作用下开始不断扩大,10 号泄水流量达最大。截至 10 日 15 时,唐家山堰塞湖前水位 725.80 米,泄流槽宽 145 米,泄流槽水深约 4.6 米。堰塞湖目前库容约 1.4 亿立方米,泄掉 1 亿立方米。6 月 12 日 8 时湖水位下降到 713.54 米,蓄水量只有 0.839 亿立方米,泄洪成功。

2.2 理论研究现状

此问题涉及三大重要领域:溃坝问题的数值模拟和水库演算,下游洪水演进模型,溃坝风险分析研究。

演进溃坝决堤现象可靠的手段是模型试验和应用计算机计算。数值求解圣维南方程组的黎曼问题成为演进溃坝波的主要手段。包括特征线法、有限差分法、有限元法、有限体积法等。近年欧洲CADAM和IMPACT项目专门对溃坝洪水的一二维数值模拟进行探索^[2]。

由于溃坝洪水巨大危害性,世界各国对溃坝洪水都有系统研究。目前国外应用较广的是美国国家气象局开发的溃坝与洪水演进模型,主要包括:DAMBRK—溃坝及溃坝洪水波动力演算模型,BREACH—土坝缺口侵蚀模型,SMPDBK—简化溃坝模型。其中最重要的是DAMBRK模型,由两部分组成:一是溃决洪水计算,包括洪水流量过程线及坝址溃坝水位计算;二是溃决洪水在下游的传播和演进模拟^[2]。

关于洪水淹没计算与评估系统的研究,集中两个方面:一是对于洪水淹没范围与面积的计算,二是洪水淹没后损失的评估。利用网格分析的思想,使用DEM数据,综合计算与评估尺度取合适的网格,实现洪水评估模型的同时可以较快准确计算洪水淹没范围^[3]。

3 问题分析

这个题目围绕堰塞湖溃坝及泄洪规律的研究,主要包括以下四大问题:

3.1 问题一

通过查询数据,堰塞湖上游集雨面积 3550 千立方米,利用天气预报进行预测,得到堰塞湖每天的湖水蓄水增量,给出湖水蓄水量随时间的关系。

然后,对于体积为 V 的堰塞湖,水面面积为 $S(h)$,随水位 h 的关系是:

$$\frac{dV}{dh} = kS(h), \text{ 其中, } k \text{ 为常数。采用量纲分析法, } [S] = L^2, \text{ 所以 } kS(h) \text{ 可表}$$

示为有关 h 的二次多项式,于是: $\frac{dV}{dh} = k_0 + k_1h + k_2h^2$, 积分后得:

$$V = c_0 + c_1h + c_2h^2 + c_3h^3。$$

利用 NEWTON 法进行多项式拟合,可以得到参数 c_0 、 c_1 、 c_2 的值,进一步用显著性检验参数。从而得到了水位高度、蓄水量和时间之间的关系模型,为接下

预测溃坝可能发生的时间奠定基础。

3.2 问题二

堰塞湖库容大小是决定溃决风险大小的最为关键的因子,也是分析预测堰塞体坝前水位、溃坝洪水流量等的基础。从问题一预测我们可以得知具体某天对应的堰塞湖坝前水位及库容量。

溃坝研究的重要环节是模拟溃坝决口的发展过程和计算溃口洪水的流量过程。堰塞湖蓄水漫顶后,水流对坝体进行冲刷,结构受到侵蚀而溃坝,本题采用漫顶模型形式。宏观上讲,我们可以得到水库溃坝后流量和库容的关系为 $\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t)$ 。一旦溃口裂缝形成,洪水会腐蚀这缺口,裂口变大又会使水量增大,它又使大坝裂口加速恶化,这种相互作用一直持续到水库的水流完,或者大坝能抵制住缺口扩大,这部分我们可以利用水流连续方程估计从裂缝中流出的水量 Q_0 。

因为漫顶溃坝后,很快溃坝的中间会形成一个较大裂口,在水流作用下逐渐增大。侵蚀过程中流量过程起决定作用的溃口泥沙侵蚀和水流运输能力和溃口形状和构成物质有关,我们合理假设了开始裂缝为梯形,为山区土坝结构,推断出溃口侵蚀模型。溃口底宽在溃决历时范围内,以线性或非线性速度增长,我们推出溃口底部的扩展模型,从而得到最终形成的溃口底宽和最终溃口底高程。

通过查找相关文献,我们选择了宽顶堰流量计算公式来计算水流通过溃口控制横断面的流量,建立了溃口流量模型。

至此,我们的溃坝模型包含了缺口宽度、深度、水位高程、流水速度、水量和时间等变量。我们模拟了自然漫顶后溃坝的模型,得到相关变量随时间的分布。接着,我们参考了本次泄洪采用的泄洪槽大小,进行了相关的模拟,通过和实际的新闻媒体发布的消息作对比,验证了我们溃坝模型的有效性。这为第三问建立溃坝洪水下游演进模型提供了依据。

3.3 问题三

由第二问我们能够知道,1/3 溃坝时蓄水量变化和流量,从而我们能够建立相关模型来给出洪水的水流速度。考虑到洪水在 1/3 溃坝时主要还是在通口河和涪江的河道中演进。所以我们可以假定洪水是一维演进,而且河道宽度处处相等。

由模型推出的水流演进速度,我们可以得知到达各地的时间,以及当地的水位高度,进而判断淹没区域情况,对人口密集的绵阳市,我们提供相关人员撤离方案。在保证人员安全同时,让灾民尽快到可能达到的水位高度以上的高地去避洪。

3.4 问题四

如今距离堰塞湖泄洪已有三个多月,当时的抗灾抢险工作是在极度恶劣环境下进行的,并且缺少相关的数据支持。科研工作者和决策者能够果断进行模拟研究,设计了相关泄洪槽,从泄洪结果来看,抢险成功。我们利用了自己的模型结果,分析了有泄洪槽和自然漫坝时的灾难情况,分析了人员撤离的方案合理性。进一步给出了未来科技工作有待解决的关键问题,以便科学系统地应对地震灾后次生灾害。

4 模型假设和符号说明

为了建模需要,我们对问题做以下合理假设:

- (1) 唐家山堰塞湖流域的集雨面积为 3550 km^2 。
 - (2) 连日的降雨造成土壤饱和，上游降雨大都汇集至堰塞湖中。
 - (3) 降雨量汇入湖水中会延时，假设延时呈线性关系，当天的降雨量以相等的量延时分配给接下几天湖水上涨。
 - (4) 媒体天气预报是科学准确的，预报因子采用题目给的 50%、80%、100%、150%。
 - (5) 堰塞湖溃坝模型应该符合当时泄洪槽泄洪时测得的实际数据。
 - (6) 溃口演变时的基本形状为梯形口。
 - (7) 溃口为土坝，侵蚀过程与水流运输能力、溃口形状有关。
 - (8) 文献当中政府实施方案和泄洪结果公布情况的真实性。
 - (9) 问题三中，洪水的演进模型为一维演进，河道宽度可以认为恒定。
- 各个模型中使用到的符号说明详见论文中。

5 问题 1 求解——唐家山堰塞湖蓄水量和水位高程预测模型

5.1 堰塞湖来水预报

堰塞湖分布区域广而且地理条件复杂，极少水文、水情资料，为来流预报工作带来极大困难。数字流域模型利用数字高程数据 DEM 提取河网，得到河网的每条河段的长度、坡度、集雨面积等信息，从而利用河网逐级汇流和基于河网的分布式集群计算，进行不同降雨情景下的堰塞湖入流过程和坝前水位上涨过程的预测。

考虑到当地山区当时情况，堰塞湖来水主要是降雨形成，而且当地由于连日降雨，土壤将近饱和，所以上游的降雨大都汇集至堰塞湖中。据文献资料^[1]，唐家山堰塞湖流域面积 3550 km^2 ，大部分区域位于绵阳市北川县内。

结合天气预报，我们认为降雨面积等于流域面积。但是，当天的降雨需要经过一定的时间才完全汇集到湖中，这对于湖面蓄水量预测和水位上涨预测将会产生时间上的延迟作用。对唐家山堰塞湖的水位变化，我们进行一定的简化，认为当天的降雨量将会线性地分布在接下四天从而引起湖水上涨。对于湖水的蒸发和渗透模型，我们考虑降雨量的 90%（这个可以根据实际对预报因子进行修改）会注入湖中，从而得到堰塞湖上游来水量。

5.2 唐家山堰塞湖蓄水量与高程预测模型

根据 3.1 中对问题一的分析，对于体积为 V 的堰塞湖，高度为 h （距湖底的深度）的水面面积为 $S(h)$ ，考虑水面高度增量为 Δh 时，蓄水量的增量可表示为：

$$V(h + \Delta h) - V(h) = \frac{(S(h + \Delta h) + S(h))\Delta h}{2} \quad (1)$$

由于 $\lim_{\Delta h \rightarrow 0} [S(h + \Delta h) - S(h)] = 0$ ，不妨令

$$\frac{S(h + \Delta h) + S(h)}{2} = kS(h) \quad (2)$$

k 为水面面积修正系数，例如蓄水截面规则的水库 k 为 1。我们通常可分析水库的 DEM 高程数据确定。联立方程 (1) (2) 得到：

$$\lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{V(h+\Delta h)-V(h)}{\Delta h} = \frac{dV}{dh} = kS(h) \quad (3)$$

采用量纲分析法, $[S]=L^2$, 所以 $kS(h)$ 可表示为有关 h 的二次多项式, 于是:

$$\frac{dV}{dh} = k_0 + k_1 h + k_2 h^2 \quad (4)$$

积分后得:

$$V = c_0 + c_1 h + c_2 h^2 + c_3 h^3 \quad (5)$$

利用 SAS 软件求解(5), 选取 NEWTON 法进行多项式拟合, 便可以得到参数 c_0 、

c_1 、 c_2 的值。实际上在这里我们可以得到三种类型方程:

$$\begin{aligned} type1: V &= c_0 + c_1 h + c_2 h^2 + c_3 h^3 \\ type2: V &= c_0 + c_1 h + c_3 h^3 \\ type3: V &= c_0 + c_2 h^2 + c_3 h^3 \end{aligned} \quad (6)$$

对这三种类型的模型进行拟合, 并对变量系数做拟合优度检验可知 (如下表), 一般选取拟合方程的类型需要参照以下三个标准: 复相关系数、p 值、均方根误差。R-square (复相关系数) 越大, P-value (p 值) 越小, Root-MSE (均方根误差) 越小, 说明方程的拟合效果越好, 综合考虑这三个因素, 可看出 type2 型的方程是最优的。

表 1 模型一方程参数拟合优度分析

类型	参数选择	R-square	P-value	Root-MSE
Type1	h	0.999173	<0.001	0.02018
	h^2		0.9735	
	h^3		0.1472	
Type2	h	0.999172	<0.001	0.019860
	h^3		<0.001	
Type3	h^2	0.997661	<0.001	0.033392
	h^3		<0.001	

Type2 方程最终的拟合结果如下:

$$V(h) = 0.689306 + 0.0434h + 9.911 \times 10^{-6} h^3 \quad (7)$$

从而得到了水位高度和蓄水量的关系模型。我们可以发现, 三次项的系数极小, 湖水的库容量和水位高度有很强的线性关系。这主要是因为堰塞湖的水面面积很大, 湖面的高低起伏对容积的影响不大, 库容量主要取决于水位高度, 符合实际情况。湖水的库容量和水位高度的拟合曲线的拟合图像如下:

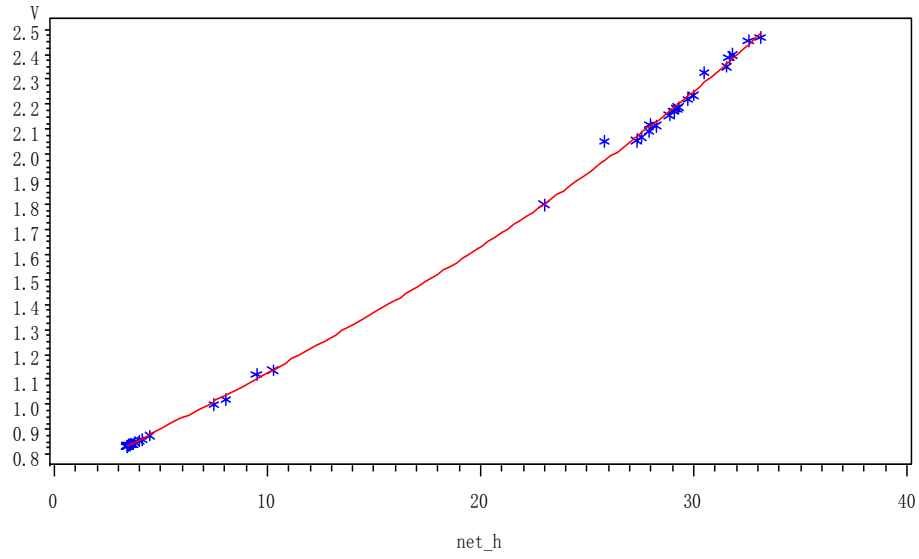


图 2 湖水的库容量和水位高度的拟合曲线

5.3 基于天气预报和预报因子的降雨量预测模型

设堰塞湖在第 i 天的库容为 $V(i)$ (单位: 立方米), 蓄水水位高程为 $H(i)$, 预报降水量为 ρ (单位: mm), 预报因子为 α ($\alpha = \text{实际降水量} / \text{预报降水量}$), 降水在流水堰塞湖的途中损耗率为 η , 其中的损耗包括降水渗透与蒸发, 集雨面积为 S 。堰塞湖是河流堵塞变成的, 因此每天不断有上游补充流水 \bar{Q}_{in} 。假设堰塞湖及其上游集雨区所积雨水经过一段时间最终汇流如堰塞湖, 这段时间造成的水库库容增加的延迟即为降水的延迟效应。

如果不考虑降水的延迟效应, 则每日水库库容的增量可表示为

$$V(i) - V(i-1) = \bar{Q}_{in} + \alpha \rho(i) S (1 - \eta) \quad (8)$$

利用 5.1 中得到的蓄水量与水面距湖底深度之间的关系, 不妨简写为 $V = F(h)$, 则其反函数为 $h = F^{-1}(V)$, 结合 (8) 式可以得到湖面高度的增量:

$$\begin{aligned} \Delta H &= H(i) - H(i-1) = F^{-1}(V(i)) - F^{-1}(V(i-1)) \\ &= F^{-1}(V(i-1) + \bar{Q}_{in} + \alpha \rho(i) S (1 - \eta)) - F^{-1}(V(i-1)) \end{aligned} \quad (9)$$

根据天气预报中所给出的数据, 根据方程 (9) 可以每日的水位高程, 如下图所示。

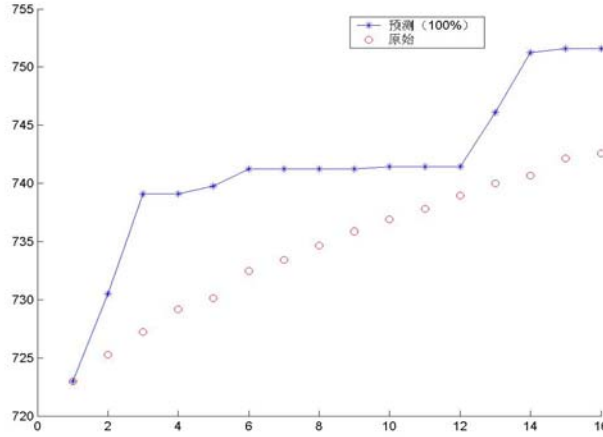


图 3 不考虑延时效应的降水预测模型

由图 2 不难发现，预测数据与实际数据出现了较大的偏差，而偏差主要发生在有降水的时候，偏差的趋势为：突然上涨——恒定不变。为了修正这个偏差，我们引入降水汇集的延迟效应修正方程 (9)。这个是符合实际情况的，因为湖上游集雨面的降水，需要一定的时间才汇流至湖中。

考虑降水汇集存在延迟效应，假设某天的降水在未来 m 天后全部汇集入湖，并且每天的入湖量相等，则每日水库库容的增量可表示为

$$V(i) - V(i-1) = \bar{Q}_m + \frac{\alpha}{m} \sum_{k=i-m+1}^i \rho(i) S(1-\eta) \quad (10)$$

结合 $h = F^{-1}(V)$ ，结合 (10) 式可以得到湖面高度的增量：

$$\begin{aligned} \Delta H &= H(i) - H(i-1) = F^{-1}(V(i)) - F^{-1}(V(i-1)) \\ &= F^{-1}(V(i-1) + \bar{Q}_m + \frac{\alpha}{m} \sum_{k=i-m+1}^i \rho(i) S(1-\eta)) - F^{-1}(V(i-1)) \end{aligned} \quad (11)$$

利用 MATLAB 编程对 (11) 求解并绘图，我们看到考虑降水延时效应修正后的模型拟合优度大大提高。

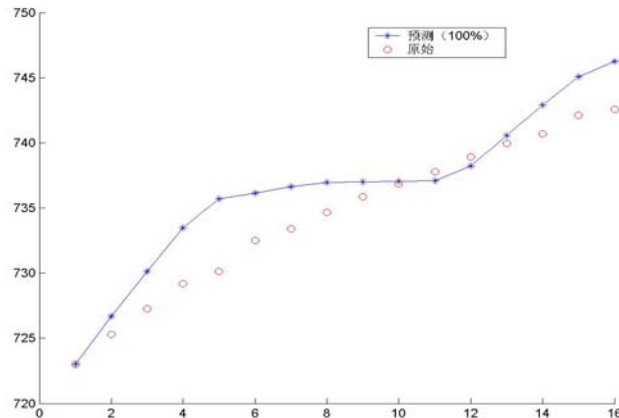


图 4 修正的降水预测模型

天气预报可以看作是一种不确定性决策,因此降水量的预报数据也存在着很大的随机性。从风险控制的角度出发,即是需要预测在不同的预报因子下出现的最坏的一种结果,并且对此进行防范。对于此题,我们分别取预报因子 α 为50%,80%,100%,150%来修正天气预报的降雨情况,并分别模拟自5月25日至6月12日堰塞湖水位的高度。

从图4中可以看出, α 取值为80%时,模拟得到的堰塞湖水位与实测结果差别最小,因此可认为实际降水为预报降水的80%;在 α 取值为150%时,6月8日堰塞湖坝前水位已经超过了坝顶警戒线,发生溃坝。另外,计算和实测结果都表明,在6月7日坝前水位高程已经达到泄流槽的底面高程739.97米($\alpha=80\%$ 时,模拟6月7日水位高程为740.4),这个已经接近溃坝警戒线752米,按照文献资料,当时平均每天湖水上升约1m,按照这个趋势,堰塞湖在十天后很大可能溃坝,将对下游造成极大威胁。可幸的是,经过十多天的努力,泄洪槽于6月7日开始泄水,10号达最高峰,洪水成功通过下游的绵阳市,泄洪成功。

至此,问题一中水位高度、蓄水量和时间之间的关系模型全部成功推得,从模拟结果来看,建立在天气预报基础上的湖水水面高度及库容量预测模型有较高的精度,可以用来模拟类似的湖水水位上涨模型。

表2 实际和不同预测因子下坝前高度随时间的变化数据

日期	实际	50%	80%	100%	150%
5-25	723	723	723	723	723
5-26	725.3	724.98	726.13	726.89	728.74
5-27	727.25	726.89	729.1	730.51	733.87
5-28	729.19	728.82	732.02	734.03	738.66
5-29	730.13	730.14	733.96	736.34	741.72
5-30	732.5	730.43	734.38	736.83	742.37
5-31	733.42	730.71	734.8	737.32	743.01
6-1	734.68	730.91	735.09	737.66	743.45
6-2	735.86	730.94	735.13	737.71	743.51
6-3	736.86	730.97	735.17	737.76	743.57
6-4	737.78	730.99	735.21	737.81	743.63
6-5	738.93	731.7	736.23	738.99	745.16
6-6	739.96	733.17	738.33	*741.44	748.26
6-7	740.67	734.65	*740.4	743.82	751.23
6-8	742.11	736.09	742.37	746.06	*753.98
6-9	742.58	736.88	743.45	747.29	755.47
6-10	742.961	738.02	744.42	748.16	756.18
6-11	743.94	739.13	745.36	749.02	756.88
6-12	744.894	740.21	746.28	749.86	757.56

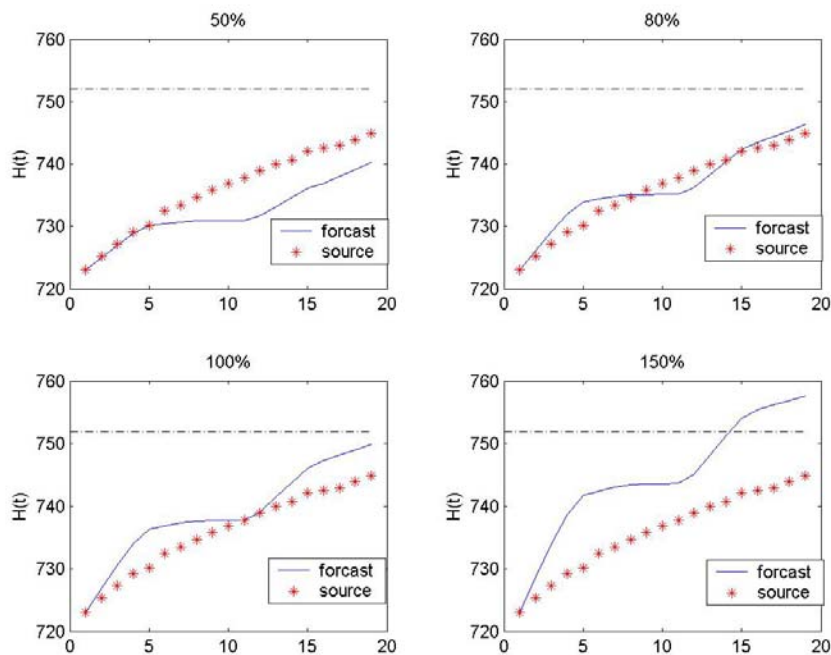


图 5 四种预报因子下的降水预测模型
(注：上述横坐标从 5 月 25 号开始，每单位一代表 1 天)

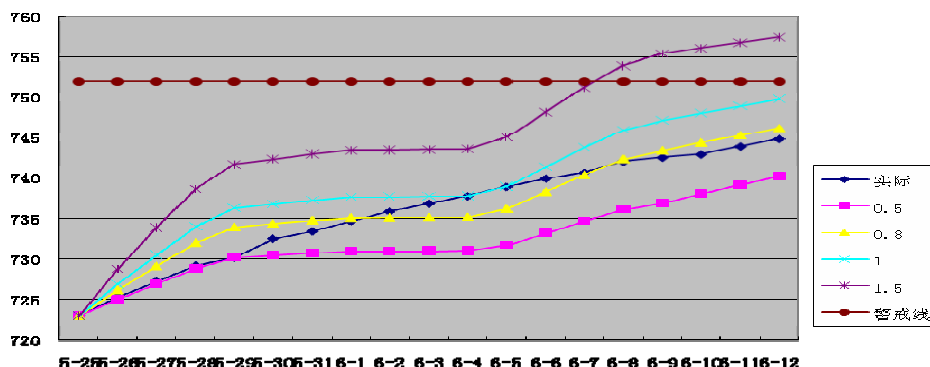


图 5 预测和实际坝前高度随时间变化曲线图

6 问题 2 求解——堰塞湖漫顶溃坝模型

6.1 溃坝模拟的主要内容

自 1965 年的 Cristofano 模型问世以来，溃坝模型在模拟大坝溃决及随后的大坝溃决洪水预报方面已经取得了明显的进步，主要包括三个方面：

上游库区的计算：我们这里主要考虑漫顶溃决，需要考虑库区以上降雨与径流的关系、入库水量等水文要素，这将决定大坝是否漫顶及漫顶的持续时间。这个问题一已经很好解决了。

坝体区的计算：包括溃口结构的确定和过坝水流的水力学计算，其中溃口结构通常要进行泥沙运输、溃口形状演变、边坡滑塌的确定和计算。过坝水力学计算中包括漫顶水流、溃口水流和下游面水流的计算。溃口流量的大小和历时将直

接影响着下游的淹没范围和淹没深度。

下游区的计算：主要是洪水波演进计算，主要任务是根据溃坝坝址的流量和水位过程线，推算演进至下游沿程各处的水位、流速。这将在问题三中重点考虑，是进行洪泛区灾害损失、风险评估的直接依据。

堰塞湖溃坝是个土坝溃决过程，土坝模型经过长足发展主要有两大类：第一类是基于参数的，主要利用一些关键参数（溃口最终宽度、溃口历时等），通过简单的时变过程（如溃口尺寸线性发展理论）模拟溃口发展，或者通过库容和坝高等关键参数与溃口发展速度及流量的回归方程来模拟。第二类基于物理过程模拟的模型，通过综合水力学、泥沙、土力学等学科知识，构建一个时变过程来模拟实际溃坝过程，典型的有 P-T 模型、BEED 模型、BREACH 模型，早已开发出强大的软件系统来进行溃坝模拟。

我们建立的溃坝模型主要参考了第一类模型。模型建立在水力学、泥沙输移、坝体几何尺寸与数学特征、水库库容和入库流量随时间变化、溢洪道特性基础上，通过合理假设提炼而成。模型由五部分组成：（1）溃口的形成；（2）溃口侵蚀模型；（3）溃口底部扩展模型；（4）库容及坝前水位计算；（5）溃口流量模型。

6.2 漫顶溃坝模型

堰塞湖是河流堵塞变成的，有来水，因此不能看作一般湖，由于不断有来水，所以水流不断冲刷一定会造成溃坝。

假定不考虑蒸发与渗透，根据质量守恒原理，水库中的储水量可由以下的微分方程描述：

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (12)$$

式中， $Q_{in}(t)$ 为入库洪水流量， $Q_{out}(t)$ 为溃坝引起的溃坝流量， V 为水库库容， t 为时间

6.2.1 漫顶溃坝流量的确定

水流漫顶初期，计算漫顶流量的方程如下

$$Q_c = CL\sqrt{2g}(N_R - N_c)^{1.5} \quad (13)$$

式中 L 为漫顶坝长， g 为重力加速度， N_R 为坝上漫顶水位， N_c 为坝顶高程，流量系数 C 可采用经验公式计算：

$$C = \frac{1}{3} + 0.132 \frac{N_R - N_c}{B_d} \quad (14)$$

式中 B_d 为坝顶宽，结合以上两个公式，我们需要补充两点假设：（13）在漫顶初期，水流开始侵蚀坝体，形成溃口；（14）水库内水的流速以及产生的漩涡对漫顶溢出流量没有影响

6.2.2 溃决过程的 E2ED 模型（Erosion to Extend and Discharge）

（一）溃口侵蚀模型

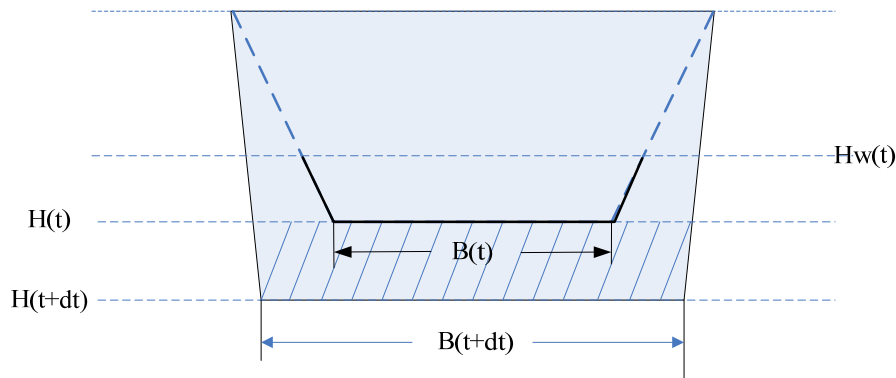


图 6、溃口微元侵蚀模式

假设溃口为梯形口。土石坝在溃决失事发生以后，水流将继续侵蚀溃口，被侵蚀的泥沙由水流带走，从而是溃口不断扩大，因而溃口的侵蚀过程在整个溃口的流量过程模拟计算中起着决定性的作用。溃口泥沙侵蚀和水流运输能力的大小与溃口的形状、筑坝物质的性质有关。

设时刻 t ，溃口高度位于 $H(t)$ ，溃口底宽为 $B(t)$ ，水库内部水面高度为 $H_w(t)$ 。由于在高速水流下的泥沙侵蚀和运输机理尚未有成熟定论，为简单起见，我们假设溃口泥沙的运输量 ΔQ_m 与坝体长度 L_B ，溃口湿周 P_B （即水流与溃口的接触横断面周长），水流瞬时流量 $Q(t)$ 以及泥沙侵蚀输送率 k_s 有关。

考察在一个单位时段 $(t, t + \Delta t)$ 内的泥沙输送量，

$$\Delta Q_m = k_s Q(t) \Delta t \quad (15)$$

由于 Δt 很小，所以 ΔQ_m 的体积可以近似地通过溃口湿周展开得到的矩形面积乘以溃口高度差来表示，即

$$\Delta Q_m = P_B L_B (1 - p) [H(t + \Delta t) - H(t)] \quad (16)$$

其中 p 表示筑坝物质的空隙率。

合并（15）（16）式，我们得到

$$k_s Q(t) \Delta t = P_B L_B (1 - p) [H(t + \Delta t) - H(t)] \quad (17)$$

（17）式两边同除 Δt ，令 Δt 趋于零，得

$$\frac{dH}{dt} = \frac{k_s Q(t)}{P_B L_B (1 - p)} \quad (18)$$

注意到此时水位 $H_w(t)$ ，因而有

$$P_B = 2[H_w(t) - H(t)] + B(t) \quad (19)$$

根据 (18) (19), 我们可以得到溃口高度 $H(t)$, 溃口底宽 $B(t)$, 水库内部水面高度 $H_w(t)$, 即得溃口的侵蚀模型。

(二) 溃口底部扩展模型

首先考虑自然溃决溃口底部扩展模型。

假设在 t 时刻, 溃口底宽为 $B(t)$, 然后在溃决历时范围内, 以线性或非线性的速度增长, 直到某个时间, 形成最终的溃口底宽 B_m . 则 t 时刻溃口瞬时底宽可由下式确定:

$$B(t) = B_m \left(\frac{t}{T} \right)^\rho \quad (20)$$

其中 T 为坝体溃决历时总时间; ρ 是描述溃口非线性程度的参数, 若假设为线性速度变化, 则有 $\rho = 1$.

(6) 式所表示的溃口底部扩展模型在坝顶宽度不大的时候能够有效反映溃口的变化情况, 但实际情况中, 溃口的初始宽度始于某个大于零的 B_0 值, 而不是从一个点开始溃决, 实际上我们对唐家山堰塞湖的坝体开挖泄洪渠, 就是形成了一个初始的溃口. 根据以上分析, 我们得到改进的溃口底部扩展模型:

$$B(t) = B_0 + (B_m - B_0) \left(\frac{t}{T} \right)^\rho \quad (21)$$

6.2.3 溃口流量模型

唐家山堰塞湖坝体的溃决主要是由于水流漫过坝体后, 将坝体物质带走所造成的, 根据 Sigh 和 Scarlato 等的实验观察表明: 水流通过溃口控制横断面的流量计算可用宽顶堰流量计算公式:

$$Q(t) = \alpha B(t) (H_w(t) - H(t))^{1.5} + \beta \tan \phi (H_w(t) - H(t))^{2.5} \quad (22)$$

式中 $Q(t)$ 为溃口流量, $B(t)$ 为瞬时溃口底宽, $H_w(t)$ 为坝顶水位, $H(t)$ 为溃口底部高程, ϕ 为溃口边坡与底部形成的夹角. α 是对流速的修正系数, β 是对溃口边坡的修正系数, 需要用实验来测得. 文献【RoDaB】中的实验结果显示, $\alpha = 3$, $\beta = 2$ 。

由问题一的模型, 我们可以得知水库的蓄水量和坝前水位随时间的关系, 即 $V(t) = f(H_w)$, 因此我们可以知道, $H_w(t) = f^{-1}(v(t))$ 。

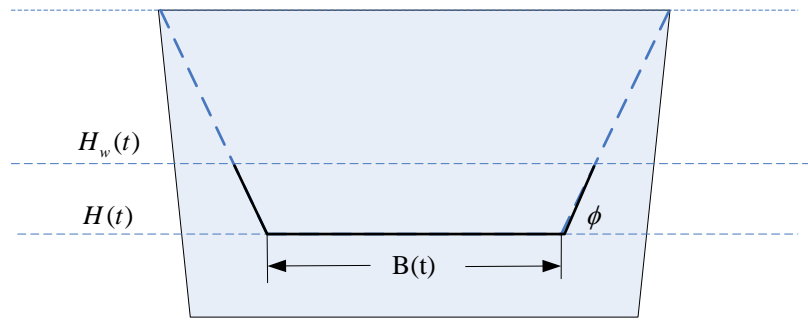


图7 宽顶堰流量计算公式用到的溃口示意图

6.2.4 计算机模拟算法思路

我们上面的溃坝模型很好解释了溃口的变化，但是建立的方程组的解难以用解析的形式表示。因此，我们利用计算机模拟溃坝的过程，我们将上述模型分成几大模块，分别计算漫顶流量、库容、溃口侵蚀形成尺寸、当前坝前深度。

计算机模拟算法的思路如下：

Step1: 初始化水坝、堰塞湖的参数；

Step2: 判断是否已存在泄洪槽，如果存在转向 step3，否则转向 step4；

Step3: 调用漫顶溃坝模型计算漫顶流量；

Step4: 时间向前滚动；

Step5: 调用天气预报模块，计算库容增量；

Step6: 调用溃口侵蚀模型与溃口扩展模型计算新形成的溃口尺寸；根据新的溃口尺寸计算流量；

Step7: 判断库容是否小于零，是则结束程序，否则继续；

Step8: 判断溃口深度的变化是否小于某一个阈值（例如 10^{-6} ），是则结束模拟，否则跳转至 Step4。

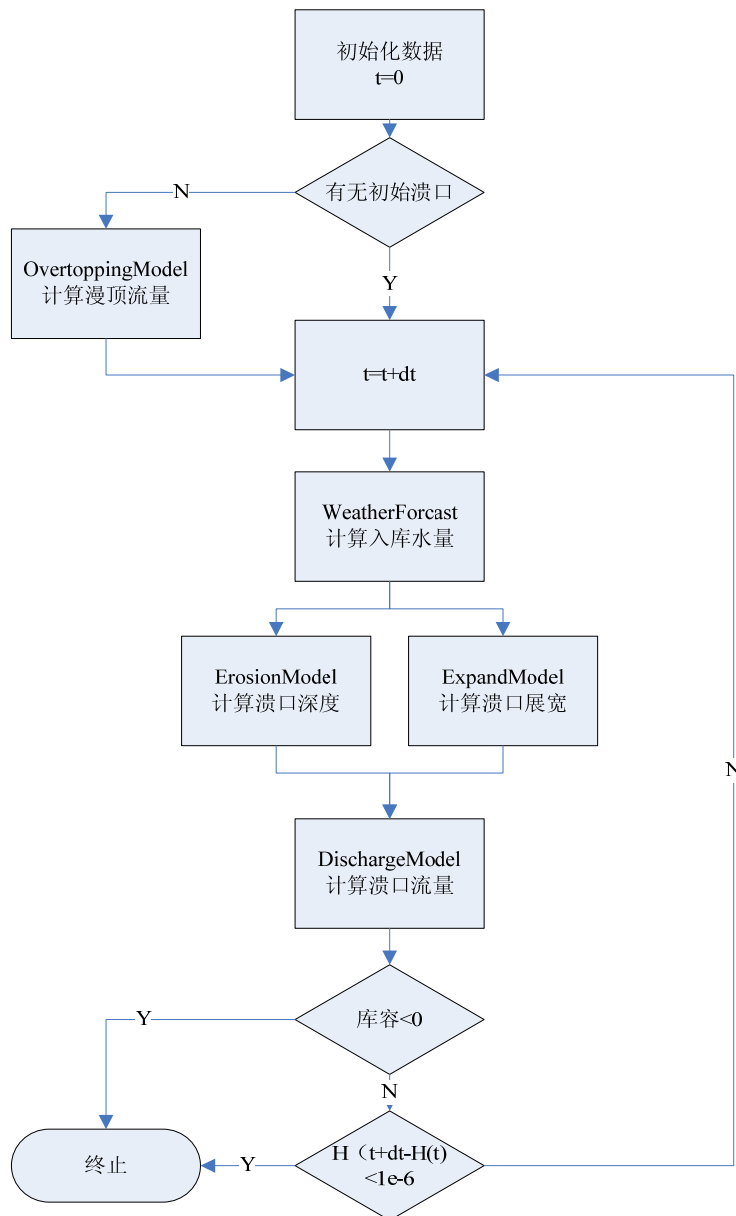


图 8、溃坝模型计算机模拟算法流程图

6.2.5 模拟结果分析

模型中存在很多参数，有些参数可以从文献中得到，但其中还有部分参数需要根据唐家山堰塞湖的实际情况进行调整，从而得到能够反映实际的实用模型。我们能够得到开挖泄洪槽后，实际的泄洪过程及相关数据。因此，我们先模拟现实中开挖泄流槽的泄流过程，通过调整参数的值使得模拟结果逼近真实结果。这样我们得到的模型将会形成一个针对当时堰塞湖湖体情况的计算机仿真模拟系统。

模型中初始参数有：

(1) 坝体参数：坝体顶长 340 米，顶宽 40 米，缺口深 12 米，顺河长约 803 米，横河宽最大约 611 米，坝高 82~124 米，坝顶面宽约 300 米；

(2) 堰塞湖参数：库容量约 3.2 亿立方米，日入湖水量约 700 万立方米，水位每天上涨 1 米左右，湖上游集雨面积 3550 平方公里。

(3) 需要模拟调整的参数有：最终形成的溃口底部展宽，水流运送坝体物

质的运输率，坝体物质空隙率。

经过多次逐步调整参数，使得模拟数据与真实数据误差逐渐减小，直至稳定。此时认为参数已调整完成，我们通过模拟得到的调整参数的值如下：

最终形成的溃口底部展宽为 150 米，水流运输率为 0.01 千克/秒，坝体物质空隙率为 0.1。我们还可从下图中看到，经过 20 小时后水库容量降至约 0.8 亿立方米。

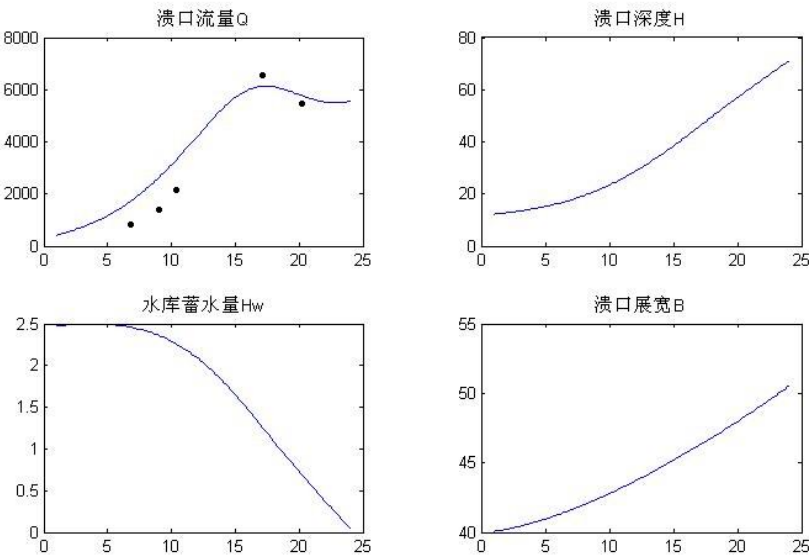


图 9 唐家山堰塞湖溃决过程模拟图

接下来我们模拟坝体漫顶溃流的过程。调整坝体初值与参数，使得它们满足漫顶溃流的条件：顶宽 150 米，深 1 米，最终形成的溃口底部展宽为 200 米，溃决时长 3 小时。模拟结果如表（3），图（10）所示。

表 3 唐家山堰塞湖溃决过程模拟数据

变量	10min	20min	30min	40min	40min
H	1	15.681	16.955	18.678	21.062
Q	23975	2526.6	3558.3	5164.4	7740
V	2.457	2.3138	2.2992	2.2785	2.2482
B	150	151.96	155.56	160.21	165.71
	50min	60min	70min	80min	90min
H	29.376	36.781	48.281	66.861	98.471
Q	19407	32817	58672	112610	236180
V	2.1309	2.0151	1.8188	1.4674	0.79236
B	178.87	186.38	194.44	203.03	212.11

模拟结果显示：如果唐家山堰塞湖坝体在没有泄洪槽的情况下，坝前水面高程达 752 米时，将会自然漫顶溃决。此时开始泄洪时瞬时流量可达 23975 立方米/秒，最大可达 236180 立方米/秒。在 90 分钟内，水库内蓄水由 2.457 亿立方米降低至 0.79236 亿立方米。这样大量的水将会造成下游区域在很短时间内受到洪水的淹没，届时下游水面高度将会高于河边的坝高而向四处漫溢。对于北川县城或者绵阳市区等相对较低平原处，洪水将会对这些地区造成很大的灾难。因此，

当时专家们果断采取科学预测，利用工程措施开挖泄洪槽，降低泄洪坝前高度，有效控制了洪水下泄的流量河覆盖区域，对堰塞湖的减灾抢险起了决定性作用。

通过模拟，我们可以得知，如果是逐步溃决危险性就不大，瞬时全溃危险性最大，最好的处理办法就是逐步降低堰塞湖的水位。

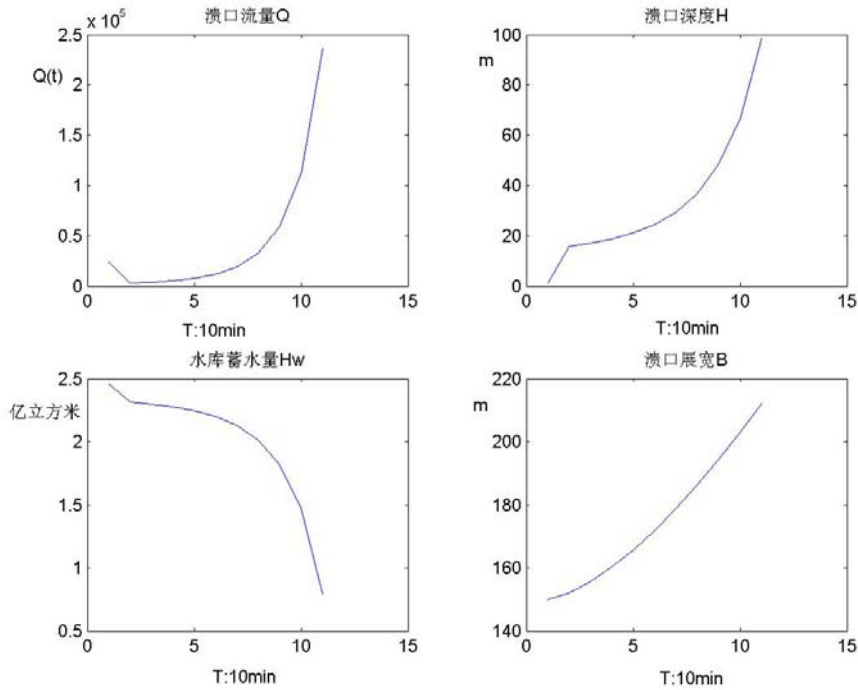


图 10 唐家山堰塞湖漫顶溃决过程模拟图

7 问题 3 求解——堰塞湖溃决洪水计算和人员撤离

通过问题一和问题二，我们可以得到来水预报和不同情形下溃坝的模型，从而得到溃坝后洪水的流量和坝前高位随时间的变化关系，进一步地，我们问题三将研究溃决洪水的推演速度及淹没范围，这是溃决风险分析的重要内容。

当时水利部组织专家对堰塞湖溃决风险及危害程度进行科学评估，针对不同溃坝模式，演算洪水过程，评估风险程度，确定洪水淹没影响范围，提出了 1/3、1/2 和全溃坝等三种溃坝模式下的洪水淹没范围，并协助地方政府和水利部门根据不同溃坝模式下的淹没范围，及时制定了相应的人员避险预案。

7.1 一维溃坝洪水波数值计算模型

考虑山区堰塞湖溃坝后湖水会沿着低洼河道进行蔓延，模拟时溃坝洪水随河道演进过程中，沿河道尺寸远远大于河道的宽度，因此可以忽略沿河横向的变化，采用一维浅水方程组，详细推导见附录一。

对水流模型的简化：假设河道的横截面为矩形，则 $A = ah$ ，其中 a 为常数，是河道的河宽；假设河道的宽是均匀的，是个定值。

则水流模型可简化为：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_x - S_f) \quad (24)$$

其中 $S_x = \frac{\partial Z_b}{\partial x}$, $S_f = \left(\frac{n}{a} \right)^2 \frac{Q^2}{h^{\frac{10}{3}}}$, n 是时间步长的步数.

我们利用数学软件给出上述方程的数值解, 其离散的形式为:

$$\frac{A_i^k - A_i^{k-1}}{\Delta t} + \frac{Q_i^k - Q_{i-1}^k}{\Delta x} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{Q_i^k - Q_{i-1}^k}{\Delta t} + \frac{1}{2\Delta x} \left(\left(\frac{Q^2}{A} \right)_{i+1}^k - \left(\frac{Q^2}{A} \right)_{i-1}^k \right) + gA \frac{1}{a} \left(\frac{A_{i+1}^k - A_{i-1}^k}{2\Delta x} \right) = gA \left(\frac{(Z_b)_{i+1}^k - (Z_b)_{i-1}^k}{2\Delta x} - S_f \right)$$

其中 k 是时间层, i 是要的结点。 (26)

上述微分方程组的数值解国内外有很多的研究成果, 但是计算量相当复杂。我们还是引用上面的微分模型理论, 但是对相关参数的做了简单处理, 得到紧急情况下的洪水演进及淹没范围估计, 从而研究撤离方案。

7.2 简化后的一维溃坝洪水波演进模型及结果

浅水方程从理论上给予我们很大的启示。但我们尚不明确溃坝波所具有的特性, 而且其数值格式也比较复杂, 在即将溃坝的危机关头, 恐怕没有足够的时间研究其相关理论。本文中我们根据一维浅水方程的指导思想, 设计了一种简化的数值解法。

模型假设:

- (1) 河道底部是均匀变化的;
- (2) 由于存在地球引力及地转偏向力, 随着洪流的演进, 洪流速度减小, 趋于某一临界值;
- (3) 洪流的蒸发及渗透作用可忽略不计。

设 t 时刻水库溃流流量为 $U(t)$, 水库内蓄水量为 $W(t)$, 此时在河道中 x 位置洪流深度为 $h(x, t)$, 速度为 $v(x)$, 流量为 $Q(x, t)$, 河流断面面积为 $A(x, t)$, 宽度为 B 。

根据假设 (2), 不难发现, 洪流演进速度 $v(x)$ 是 x 的乘幂形式, 并且满足

$$\begin{cases} v(0) = v_0, v(x) = a + bx^\alpha \\ v(+\infty) = v_{\min} \\ v > 0 \end{cases} \quad (27)$$

经过多次试验, 我们认为 $v(x)$ 应该是如下形式的方程:

$$v(x) = v_{\min} + \frac{v_0 - v_{\min}}{(x+1)^\alpha} \quad (28)$$

其中 $\alpha \in (0, 1)$, 我们测试了不同的值, 认为 α 0.1 至 0.3 比较符合河流速度

的变化规律，其中 $\alpha = 0.2$ 的方程如下所示

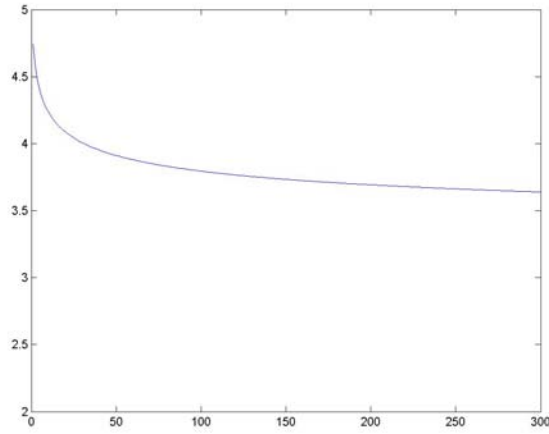


图 11 洪流演进速度变化曲线图

给定时间微元 Δt ，在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间段内，溃坝泄流的体积可表示为：

$$W(t + \Delta t) - W(t) = \frac{U(t + \Delta t) + U(t)}{2} \Delta t \quad (29)$$

泄流体积使得河道中洪流体积增加，考虑 $[t, t + \Delta t]$ 洪流前进微元 Δx ，根据质量守恒原理，可得：

$$\begin{aligned} Q(x + \Delta x, t + \Delta t) A(x + \Delta x, t + \Delta t) (x + \Delta x) \\ = Q(x, t) A(x, t) x + W(t + \Delta t) - W(t) \end{aligned} \quad (30)$$

其中横截面积与流量满足关系

$$Q(x, t) = A(x, t) v(x) \quad (31)$$

对于矩形断面的情况，又可得到方程：

$$A(x, t) = h(x, t) B \quad (32)$$

根据以上方程，我们只需选取时间步长 Δt 与空间步长 Δx ，就可以通过前向差分的方法获得所有时刻的洪流高度、流量以及演进时间。

根据问题三中提出的要求，考虑瞬间溃坝三分之一的情况，我们选取溃口深度为 30 米，溃口展宽为 300 米（即横向全溃），时间步长 10 秒，空间步长 50 米。北川县城，通口镇，成绵高桥距坝址分别为 3.5 千米，25.1 千米，64 千米。模拟结果如下图所示，北川县城，通口镇的洪流高度都超过了 3 米的拦河坝高度，全部撤离。而绵阳市只需要将低于 2.5 米的居民撤离至高地。其中，水流在 10.8 分钟到达北川县城，1.96 小时到达通口镇，6.86 小时到达绵阳市区。一维洪流的演进速度及其洪流高度随距离行程曲线见图。

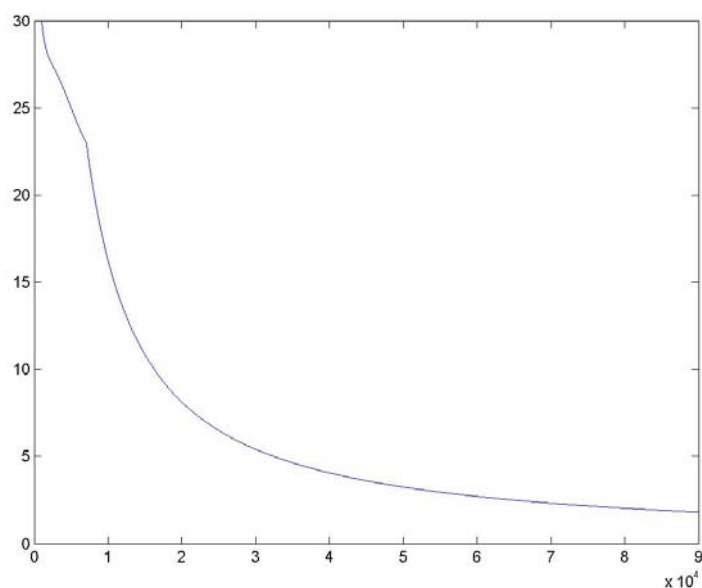


图 12 洪流随演进距离行程的变化高度示意图

7.3 水流淹没范围及绵阳市人员撤离方案

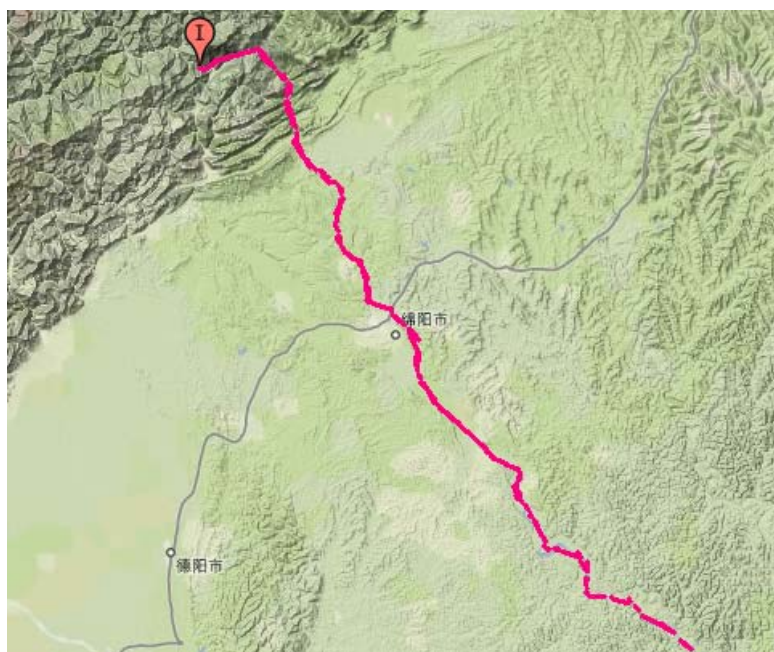


图 13 、1/3 溃坝后一维洪水演进范围线路图

根据我们上面的结论，利用 DEM 图得到相关海拔高度情况，我们得到 1/3 溃坝时洪水通过通口河、涪江等地，沿着河道下泄，不会产生对坝周边的漫顶泄流。洪水下泄线路如上图所示。

由于北川距离溃坝只有 3.5km，按照 1/3 溃坝情况的话，我们得到届时洪水的高度将会达到 20~25m，所以，北川县城附近的所有人将要全部撤离。对于绵阳城区，距离堰塞湖 64km，我们得到水流程绵阳时水深为 2~3 米，所以我们只要将距离平时河面 2~3m 的海拔高度以下的人撤离，撤离方案与原先专家预测一致，所以，我们采用绵阳的撤离区域如下：

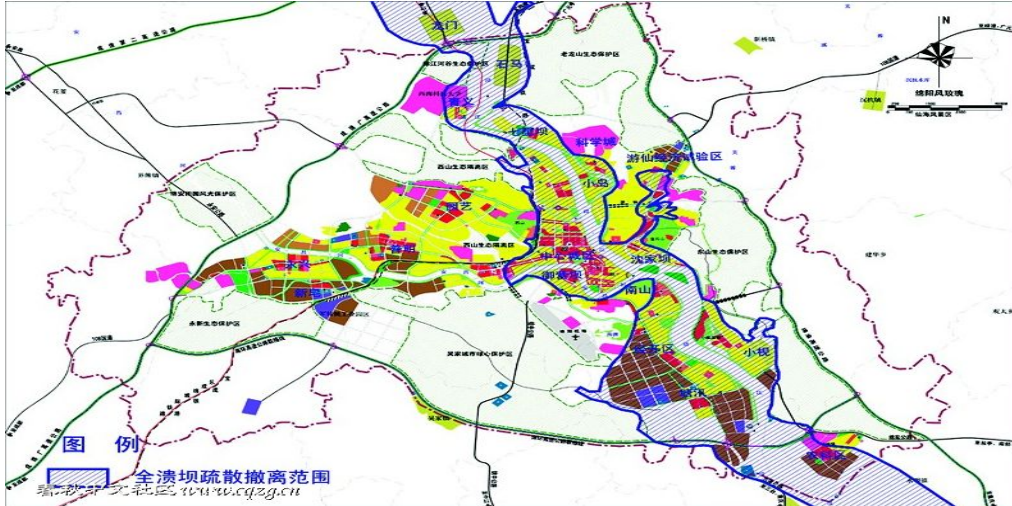


图 14 、绵阳市区人员撤离区域范围

7.4 实际泄洪水演进路线和人员撤离方案

唐家山堰塞湖位于北川县城上游 3.2 公里，由大地震造成大量山体崩溃而成。该堰塞体长 803 米，宽 611 米，高 82.65~124.4 米，估计最大可蓄水量约 3 亿立方米。堰塞湖一旦形成威胁，必须事先以人工挖掘、爆破、拦截等方式来引流或疏通湖道，使其汇入主流流域或分散到水库，以免造成洪灾。6 月 10 日后，随着泄洪高峰顺利通过绵阳市，泄洪槽泄洪成功，这是一次按照人们意愿的科学泄洪。

撤离方案中规划了 50 多条路线，保证大量群众可以在第一时间分批撤离。撤离过程中一律步行，不允许使用汽车等交通工具，以免造成道路的堵塞。据了解，最长的路线不超过 2 公里，群众有充分的时间撤离到地势较高的安置点。每个安置点都准备有帐篷、水、食品等生活必需品，可以确保受灾群众度过洪水泛滥的 24 小时。如果泄洪最佳目标实现，则仅有 16 万人需要撤离，如果发生全线溃坝，则不得不动员 130 多万人撤离。

实际由于泄洪槽作用发生的为近似 1/3 溃坝模式，洪水的推进模型和区域如下所示。





图 15、堰塞湖实际泄洪路线图[摘自文献 14]

8 问题 4 求解——模型结论评估及次生灾害研究

8.1 政府采取的排险方案

党中央、国务院、中央军委非常重视唐家堰塞湖的排险工作。2008 年 5 月 19 日，武警水电部队千余名官兵集结北川，26 号开始实施工程措施，泄洪槽 6 月 7 日开始过流，随着 6 月 10 号 15 时最大泄洪洪峰安全通过绵阳城区，排险成功。

救灾实施“工程排险和转移避险相结合”的果断决策，要求 6 月 5 号前完成排险。制定了“采用工程措施开槽引流，利用过流冲刷逐渐降底扩槽，以降低水位、减少库容、避免瞬间溃坝”的排险方案。在堰塞体右侧低洼处开挖一条泄洪槽，按照槽底泄流的控制高程，制定了“高中低”（即坝前水位 747、745、742 米）3 个方案。施工采用机械法为主，爆破法为备用方案。泄洪槽采用梯形断面，边坡坡度按 1: 1.5 控制，低方案槽底宽度为 13 米，另按此类推。排险目标为以最短时间，尽量实现泄洪槽的“低”方案，尽快过水泄流，降低蓄水位，减少蓄水量。

实际完成泄洪槽全长 475 米，进口处高程 738.5 米，槽底宽度 35 米，中间泄洪槽底控制高程 739~740 米，槽底宽度 7~12 米，完成土石方开挖 16.85 万立方米，日均开挖 1.7 万立方米。

各专业部门全面提供了堰塞湖险情监测、预报、信息交流等，确保决策科学性，保障了排险安全性。多架米-17 直升机搭载人员、食品、物资和燃料，飞往唐家山堰塞湖坝上。对堰塞体两岸山体和坝前蓄水进行不间断监测，利用卫星遥感影像技术等对险情实时监控。利用宽带无线监控系统将资料传回绵阳指挥中心，建立小型无线基站等保障通信。

8.2 泄洪过程及结果

由文献资料，6 月 7 日 7 时~10 日 1 时 30 分，历时 66.5 小时，泄流量由 $0\text{ m}^3/\text{s}$ 增大到 $100\text{ m}^3/\text{s}$ ，时段长，变幅小，泄流平缓；10 日 1 时 30 分~11 时，

泄洪量从 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 陡升至最大泄流量 $6680\text{ m}^3/\text{s}$ ，历时 9.5 小时。这段时间内没出现决口现象，更没发生溃坝，泄流过程安全，最大泄流洪峰在 4h 后（15 时 15 分）安全通过绵阳城区，排险成功。前期由于堰塞湖涨水过程，下泄流小于入库流量，随着溃口的侵蚀，后期下泄量大于入库流量，符合实际。6 月 10 日泄流高峰，槽内水深增加，泄流槽被刷深、展宽、刷蚀最大，泄流高峰时流速达 4.7 m/s 以上，槽内水深 11m，槽底被刷深 15m，槽宽由几十米急剧增大到 145m，此后泄流量减少，水深刷深速度减弱。这过程符合泄流槽的泄流机理。

从文献[1]中，我们可以得到全溃和 1/3 溃的情况下，距离堰塞湖不同沿程距离对应的当地最大水深。北川县城、通口镇和成绵高桥距坝址分别为 3.5km、25.1km、64km。三分之一溃坝，洪水到达绵阳城区的时间约需 6 小时，就是发生全溃坝，洪水到达绵阳城区的时间也需要约 4.4 小时。

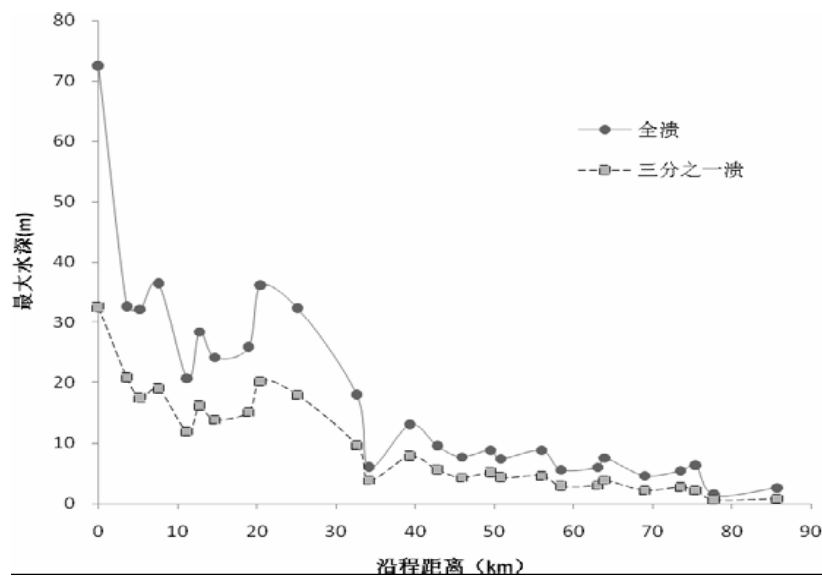


图 16 唐家山堰塞湖不同溃决方案下游计算洪水水深『摘自文献 1』

由于这次唐家山堰塞湖泄水量控制较好，泄洪溢出河道造成的淹没区面积不大。这些淹没区主要涉及北川羌族自治县的曲山、通口和香泉 3 个乡镇，及江油市的香水、青莲及九岭等 6 个乡镇的部分地区。在三台县、涪城区、游仙区等地，洪水没有溢出河道。泄洪造成的损失较少，人员迁移顺利，方案很成功。

8.3 人员撤离方案

四川绵阳市“5·12”抗震救灾指挥部 26 日下午召开唐家山堰塞湖疏散群众工作动员大会，针对可能发生的溃坝情况，组织部署三种撤离方案。

方案一（1/3 溃坝）：全市共需撤离 15.86 万人，淹没城镇面积 460.2 万平方米；

方案二（1/2 溃坝）：全市共需撤离 120.16 万人，淹没城镇面积 5368.6 万平方米；

方案三（全溃）：全市共需撤离 130 万人，淹没城区面积 6234.6 万平方米。

“有关疏散命令将在紧急情况出现前 4 至 8 小时下达。绵阳是个小盆地，群众最远 3 公里就能上山。”所以，只要是有效泄洪，绵阳市人民撤离将会非常顺利。这次泄洪过程中，绵阳 130 万的群众只剩 30 万留城，其余全部撤离到高处。无论如何北川县城的人必须得全部提前撤离，而绵阳市因为距离坝口有 60 千米，

能及时撤离，泄洪槽有效地控制了洪水泄流量，从而降低了下游河道的洪水漫溢的水深。

我们研究的重点是，以最短时间最有效的方式将危险区域人员转移到疏散地域，既要考虑合理的场地分配，又要考虑在次生灾害等突发情况下对疏散线路的优选，采用有组织的避震疏散数学模型，编制地震次生灾害影响下疏散线路的优选算法，从而得到疏散路线预案。

8.4 唐家山堰塞湖抢险方案的评估

从资料我们可以得知，本次的唐家山堰塞湖在国家高度重视和科研工程队伍的努力下，成功了抢险，泄洪槽发挥了设定的作用，灾民们得到了快速撤离，下游的绵阳市顺利避过了洪峰的威胁。决策包括：施工问题、撤离问题、爆破问题、监测问题、避险问题。

这次抗震救灾在科学研究和系统规划下，得到了很多有用经验，但是当时都是在掌握有限的资料下作出的风险评估和抢险方案，有很大的局限性，以后科研工作者应该加强关键技术问题的研究：（1）如何能有效得到快速的勘查方法和动态观测技术，获取堰塞湖的基础资料；（2）无水文资料地区堰塞湖上游水情分析，研究建立根据气象降雨资料、区域径流特征和流域多年平均等预报上游来水的估算方法；（3）堰塞体稳定性分析及溃决方式的研究。能够系统研究堰塞体在物理机理下溃坝机理分析，建立稳定性评价方法；（4）溃决洪水计算及影响评估。利用物理模拟试验和数学模型计算机模拟结合，建立溃口发展过程和溃口流量计算方法，开发基于 DEM、GIS 和三维电子江河系统平台的网格快速生成技术，建立一维、二维联合计算的软件平台，开发信息平台，为快速决策提供技术支持。

8.5 如何有效应对地震后次生山地灾害

唐家山堰塞湖险情的成功排除，创造了世界上处理大型堰塞湖的奇迹，一下是宝贵经验：（1）党中央国务院坚强领导，以人为本，科学决策。中央、军队、地方等各个部门通力协作，尤其是军队的快速攻坚和协同配合能力。（2）专业的科学技术、先进的科学成果是科学决策的关键支撑，彰显了科技救灾的绝对优势。

地震次生灾害大致可分为两大类：一是社会层面的，比如道路破坏导致交通瘫痪，煤气管道破裂形成的火灾、电讯设备破坏造成通讯中断等，还有由于污染造成的医疗卫生问题；二是自然层面上的，如滑坡、溃塌滚石、泥石流、堰塞湖等次生地质灾害和水灾，海边地区还可引起海啸。

针对我国各类地震次生灾害特点，建议国家高度重视相关的理论及技术研究，建立健全的科学评估和应用体系。包括健全：信息采集系统、天气及水文观测系统、应急通讯系统、计算机网络保障体系、决策支持系统。对于特定的次生灾害，我们能够充分借助经验理论和计算机模拟各类成熟模型，得到相关指导救灾的有效预案。

科学调度和评估是救灾抢险的核心，主要包括以下部分：

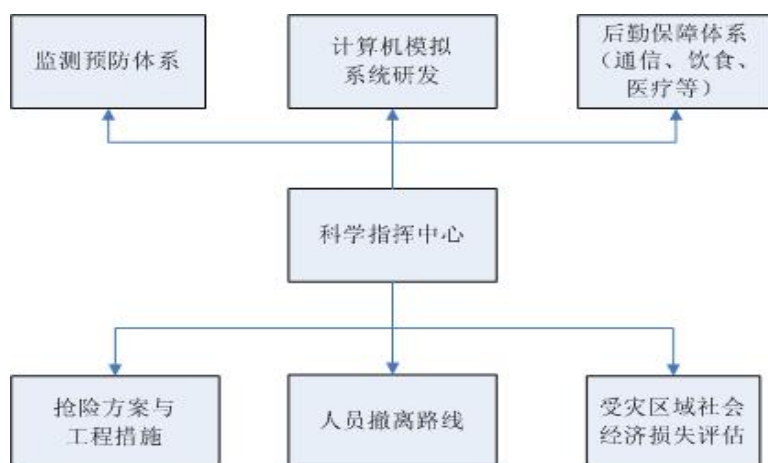


图 17 建议的次生灾害救灾抢险系统设计

应急预警预报和优化决策系统需要科研人员不断努力，同时加强全民对灾害的常规应急能力建设非常重要。包括加强公民灾害防治教育、加大对灾害应急的科研力度、健全各类应急抢险队伍建设和志愿者服务体系。建立各类包括经济、人文及自然影响的评估体系将为决策者提供强大的科学依据。

9 模型意义和进一步思索

本文通过四个问题充分研究了堰塞湖蓄水、溃坝及其泄洪规律，其中有不少模型都是在数据量很少的情况下，通过合理假设和计算机仿真模拟得到的，其研究思路和方法对复杂问题的研究，提供一定的参考价值。

本文第一问建立了湖水来水预测模型，参考了天气预报和河流来水情况，考虑了河水汇集延时效应和随机预测的因子，利用多项式拟合手段得到库容量随深度及时间的关系，为我们进一步建立类似的湖泊江河等水量预测提供有效信息。

第二问的溃坝模型，在弄清了溃坝的机理后，建立基于各个参数的溃坝模型，在难以得到解析解情况下，利用计算机仿真得到数值解和变化曲线。这能够让科研人员充分掌握是否溃坝及溃坝后的相关参数，以便决策者果断采取应对措施，包括开挖泄洪槽、人员迁移等。

第三问的水流推进及其淹没区域模拟过程相当复杂。在满足一维浅水方程组的情况下，通过对河道形状等合理假设，得到能够预测水流速度及其演进区域的模型，通过合理假设简化模型是我们常用的方法，并且，利用相关结合验证了当时决策的正确性。

第四问让我们未来科研时思考了相关的研究方向。

针对这个问题，其实国外已经有了很多理论成果和软件系统，但是研究依旧很热，希望我们的科研人员能够心系人民，研究关系重大灾难的关键问题及评价。希望能够通过现代的计算机技术和遥感测试等相关最新科技，建立更加健全的应急预警预报和优化决策系统。

参考文献

- [1]王光谦,傅旭东等,汶川地震灾区堰塞湖应急处置中的计算分析,2008.7
- [2]王立辉,溃坝水流数值模拟与溃坝风险分析研究,南京水利科学研究院,2006.7
- [3]陈凯,洪水淹没计算与评估系统的研究与实现,中南大学硕士学位论文,2004
- [4]匡尚富,汪小刚等,堰塞湖溃坝风险及其影响分析评估,中国水利水电科学研究院,中国水利,2008.16
- [5]刘帆,一维溃坝模拟及四川堰塞湖应急计算,水利水电工程系,清华大学学士论文2008.6
- [6]李虎章,刘松林,唐家山堰塞湖成功排险综述,水利水电技术,第39卷,2008年第8期
- [7]黄金池,何晓燕,溃坝洪水的统一二维数学模型,水利学报第37卷,2006.2
- [8]王立辉,胡四一,溃坝问题研究综述,水利水电科技进展,2007.2
- [9]刘德平,溃堤洪水及冲刷坑分析计算方法综述,电力勘测设计,2006.2
- [10]姜云昭、朱万红等,地震次生灾害影响条件下人员疏散问题的研究,中国安全生产科学技术,2008.2
- [11]<http://www.madio.cn/mcm/forum-126-1.html> 数学中国,2008 第五届全国研究生数学建模大赛题目及数据
- [12]http://news.xinhuanet.com/newscenter/2008-06/10/content_8338676.htm 新华网,提供大量实际报道文献
- [13]MCM 2005A 题 Flood Planning 论文 —Saluda 流域水坝决堤的分析
- [14]news.163.com/08/0611/05/4E4QR69P0001124J.html 唐家山堰塞湖实际泄洪线路图
- [15]<http://bbs.cqzg.cn/thread-638660-1-4.html> 唐家山堰塞湖全溃坝绵阳城区疏散撤离范围示意图